

다중사용자 OFDM 광대역 무선인터넷 시스템의 자원할당 방법¹⁾

Resource Allocation for Multiuser OFDM Systems

정용주*, 백천현**, 김후곤***

* 부산외국어대학교 인터넷비즈니스공학과(chungyj@pufs.ac.kr)

** 동의대학교 기계산업시스템 공학부(paikch@deu.ac.kr)

*** 경성대학교 경영정보학과(hkim@ks.ac.kr)

Abstract

본 연구는 무선 및 사용자요구사항 등 환경의 변화에 따라 부반송파(subcarrier) 할당, 변조방식 및 전력량을 조절하는 적응형 다중사용자 OFDM 시스템을 다룬다. 먼저 사용자별 전송요구 비트수 및 전체 사용가능한 전력량에 대한 제약 조건하에서 총 데이터 전송량(Throughput)을 최대화하는 최적화 문제를 모형화한다. 이 문제는 대부분의 기존 연구들을 포함할 수 있을 정도로 포괄적이지만 미분이 불가능한 비선형 최적화 문제이면서도 빠른 계산시간을 요구한다. 본 연구는 쌍대간격(Duality Gap)이 0이라는 제안 문제의 특성을 바탕으로 하여 Subgradient 쌍대최적화(Dual Optimization) 기법을 적용한다. 또한 이러한 접근법은 사용자 또는 무선환경의 변화에 적극적으로 적응하는 무선자원 할당 메커니즘을 제시한다.

1. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 ADSL 등의 유선통신 시스템뿐만 아니라 와이브로(Wireless Broadband,

휴대인터넷), Wimax 등의 광대역 무선인터넷 통신 실현을 위해 가장 유력한 전송기술로 인식되고 있다. OFDMA 방식은 가용 주파수자원을 여러 개의 부반송파(subcarrier)로 나누는데 이때 각 부반송파의 대역폭과 시간축의 전송단위인 프레임의 길이는 부반송파간 상호간섭이 최소화하도록 설계된다. 한 사용자에게 다수의 부반송파를 동시에 사용할 수 있도록 함으로써 무선자원의 효율성을 제고한다. 또한 가변변조(Adaptive Modulation)방식을 적용하여 부반송파에서 전송환경의 변화에 따라 프레임별로 다른 변조방식을 사용하도록 하여 프레임별로 전송하는 비트의 수를 조절할 수 있다.

이러한 특징을 가진 OFDM 시스템에서는 부반송파, 전력(power) 또는 전송데이터량²⁾ 등의 가용 자원의 사용방법이 시스템 효율성에 결정적 영향을 미친다. 즉, 각 부반송파를 어떤 사용자에게 할당하고 할당된 부반송파에 얼마만큼의 전력을 할당할 것인가(또는 몇 비트를 전송할 것인가)를 결정하는 문제가 OFDM 시스템에서의 자원할당문제이다. 이때 사용자간 형평성(fairness), 총 전송데이터량(throughput) 등의 시스템 수준의

2) 전송 데이터량(비트수)는 전력의 함수로 표현된다. 또한 변조방식은 전송비트에 따라 결정된다. 따라서 전력 또는 전송 데이터량을 결정하게 되면 나머지는 이에 따라 결정된다.

1) 본 논문은 2005년 학술진흥재단 협동연구과제 지원으로 이루어졌습니다.

성능 요소뿐만 아니라 사용자별 전송데이터량, BER(Bit Error Rate) 등의 사용자 단위의 요구사항 및 특성이 고려되어야 한다.

전송 데이터량은 전력에 대한 로그함수 형태로 표현되기 때문에 OFDM 시스템에서 자원할당 문제는 목적함수 또는 제약식에 비선형함수가 포함된 비선형문제로 정의되고 일반적으로 문제의 결정변수는 부반송파의 할당과 전력할당량(또는 전송 데이터량)이다.

OFDM 시스템을 대상으로 하는 전송자원의 최적 활용과 관련된 대부분 연구는 크게 다음 두 가지 분야로 구분된다:

① Marginal Adaptive(MA) 문제 : 특정한 데이터 전송속도를 최소의 전력을 가지고 전송하는 문제[5],[8],[11],[12],**오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.**

② Rate Adaptive(RA) 문제 : 일정한 전력을 가지고 최대의 데이터 전송속도를 구현하고자 하는 문제 [2],[3],[7],[9],[10],**오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.**[16]

고속 무선인터넷 시스템에 앞서, 유선시스템에서 위 2가지 영역에 대한 연구가 이루어져 왔는데 [18], 대부분 단일 사용자(user)에 국한된 연구이다. 즉, 단일 사용자가 채널이득(channel gain)이 서로 다른 정해진 수의 부반송파를 사용할 때, 어떤 부반송파에 얼마만큼의 전력을 할당해야 제한된 전력을 이용해 데이터 전송속도를 극대화할 수 있는가를 연구하는 것이 유선시스템 분야에서 이루어진 RA문제이다. 단일 사용자 RA 문제는 water-filling 알고리즘을 사용하여 최적해가 구해질 수 있다[1]. 실제로, 최적해 water-filling 수준은 convex programming 문제의 최적 라그랑지안 승수(Lagrangean multiplier)가 된다. 또한, 단일 사용자 RA문제의 쌍대(dual) 문제가 바로 단일 사용자 MA문제이기 때문에, MA문제의 최적해 역시 구할 수 있다.

OFDM를 사용하는 무선인터넷 시스템은 특정 시점에 부반송파 자원의 할당을 요구하는 사용자가 다수 존재한다는 점이 기존 유선시스템 환경과는 다른 점이다. 여기에, 무선환경 특성으로 인해, 각 사용자와 부반송파간 채널이득(channel gain)이 다르며, 사용자에 따라 요구 데이터 전송 속도도 역시 구분되는 것이 보통이다[2][6][11]. 이러한 요인들로 인해 OFDM 무선인터넷 시스템 환경하의 RA 및 MA문제는 유선시스템 환경하의 것들과 비교해 매우 복잡한 문제가 된다. 따라서, 이 분야 연구의 대부분은 최적해 보다는 근사해를 효율적으로 구하는 연구에 집중되어 있다. 또한 일반적으로 추가적인 도입을 도입하여 문제를 단순화함으로써 부반송파 할당 단계와 전력(또는 비트)할당 단계로 구분하여 접근하고 있다[2][3][10].

먼저 MA문제에 대한 기존 연구를 살펴 보면 다음과 같다. C.Y. Wong et al.[11]은 기존 water-filling 문제를 OFDM 시스템에 확대 적용하여 OFDM시스템에서 무선자원 할당을 위한 최적화 문제를 정립하였다. 전송 비트수에 대한 정수조건을 추가하여 라그랑지안 완화기법(Lagrangean Relaxation)을 사용하여 총전력에 대한 하한과 부반송파 할당을 구한다. 부반송파 할당을 바탕으로 비트 및 전력할당을 수행하는 휴리스틱 기법을 제시한다. I. Kim et al. **오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.**[17]는 사용자의 전송비트수의 최소값을 최대화하는 RA문제를 제시하고 MA간의 관계를 조명하고 있다. 정수 프로그래밍(integer programming) 문제로 변환하여 구한 해의 특징을 분석한다. 해의 특징을 바탕으로 문제를 단순화 시킴으로써 부반송파 할당과 비트할당 단계로 분할하고 선형프로그래밍을 적용하여 부최적해(suboptimal)를 구하는 방법을 제시하고 있다. D. Kivanc et al.[5]은 MA문제를 각 사용자에게 필요한 부반송파의 수를 구하는 자원할당(Resource

Allocation)과 자원할당에서 구한 부반송파의 수에 따라 실제 부반송파를 할당하는 부반송파 할당문제(Subcarrier Allocation)로 분할하여 접근한다. 두 분할문제에 대한 해법으로 한계그리드 탐색법과 water-filling의 응용기법을 제시하고 있다.

RA문제에 대한 기존 연구는 다음과 같이 요약된다. J. Jang et al.[3] 및 G. Li et al.[16]는 부반송파의 전송률을 최대화하기 위해서는 채널이득이 가장 좋은 단일 사용자에게 부반송파를 할당해야 함을 이론적으로 증명하였다. Z. Shen et al.[10]과 C. Mohanram et al.[15]은 기존 RA문제에 사용자간 데이터 전송량에 대한 상대비율에 대한 제약식을 추가함으로써 사용자간 자원이용의 형평성(fairness) 개념을 도입하였다. G. Li et al.[7]은 대기이론을 적용하여 사용자의 요구사항을 버퍼 overflow에 의한 데이터 폐기(outage) 확률로 설정하였다. 버퍼의 크기가 주어졌을 때 사용자의 outage 요구사항을 만족하면서 데이터 전송량을 최대화하는 문제를 다루고 있다.

RA문제에 대한 기존의 연구들은 사용자의 요구 QoS(예를 들어 전송데이터율)을 반영하지 못하고 있을 뿐만 아니라 채널환경이 우수한 사용자에게 독점적으로 자원을 할당하는 불평등 현상을 보이고 있다. 또한, 실시간으로 운용하기에는 수행시간이 길거나 채널환경이 고정된 시스템에서의 무선자원을 할당하는 것을 목표로 하여 사용자 및 무선의 환경 변화에 따라 역동적으로 자원을 할당해야 하는 현실을 반영하지 못하고 있다.

본 연구에서는 위와 같은 기존 RA관련 연구들이 가지는 문제점을 보완하여 보다 일반화된 모형을 제시한다. 총 사용전력에 대한 조건 및 사용자별 데이터전송량에 대한 제약조건하에서 전체 시스템의 데이터전송량(Throughput)를 최대화하는 문제를 대상으로 한다. 또한, 문제의 해법으로 Subgradient 쌍대해법(Dual Optimization)을 사용함

으로써 사용자의 최적해로의 수렴을 보장하고 서비스 신규접속이나 접속해지 등에 따른 사용자의 수의 변경 및 시간의 흐름에 따른 무선환경의 변화에 적극적으로 적응하는 무선자원 할당 메커니즘을 제시한다.

2. 문제 정의

2.1 최적화 문제

본 연구는 OFDM 무선접속기술을 사용하는 광대역 무선인터넷 시스템에서 사용자별 요구사항을 만족하면서 무선자원의 효율성을 극대화하는 무선자원의 할당 메커니즘을 모색한다. 이는 아래 모형(P)과 같이 사용자단위의 전송속도와 전체 전력소모량에 대한 제약하에서, 전체 시스템의 데이터전송량(Total Throughput)을 최대화하는 각 사용자에게 대한 부반송파의 전력할당량을 구하는 문제로 모형화된다.

$$\begin{aligned}
 &P: \\
 &\max \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) \\
 &s.t. \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n} \leq P_{tot} \\
 &\quad \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) \geq R_k, \forall k = 1, \dots, K \\
 &\quad P_{k,n} \geq 0 \quad \forall k = 1, \dots, K, n = 1, \dots, N
 \end{aligned}$$

여기서

$k \in \{1, 2, \dots, K\}$: 사용자 인덱스

$n \in \{1, 2, \dots, N\}$: 부반송파 인덱스

$g_{k,n}$: 사용자 k 와 부반송파 n 간의 채널이득 (channel gain)

$P_{k,n}$: 사용자 k 의 데이터를 전송하기 위하여 부반송파 n 에 할당된 전력량

Γ_k : 사용자 k 에게 요구되는 BER_k 를 만족하기 위하여 필요한 신호대잡음비(signal to noise ratio; SNR)

σ^2 : 잡음(noise power)

첫 번째 제약식은 전체 소모전력의 량에 대한 조건이고 두 번째 제약식은 각 사용자 별로 요구되는 전송비트의 수를 나타낸다.

2.2 라그랑지안 쌍대문제 (Lagrangian Dual Problem)

문제 (P)의 첫 번째와 두 번째 제약식을 완화한 라그랑지안은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
 & RP(\lambda_0, \lambda) \\
 &= \max \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) \\
 & \quad + \lambda_0 (P_{tot} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n}) \\
 & \quad + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left(\sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) - R_k \right)
 \end{aligned}$$

s.t. $P_{k,n} \geq 0 \quad \forall k, n$

여기서 $(\lambda_0, \lambda) = (\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_K)$ 는 라그랑지안 쌍대변수로서 λ_0 는 단위 전력당 가격으로, $\lambda_k, k \in \{1, \dots, K\}$ 는 사용자 k 의 전송요구 비트수 R_k 를 초과하여 전송되는 비트당 수익(효용)으로 해석된다.

문제 (P)의 쌍대 문제(Dual Problem)는 다음과 같이 정의된다.

DP: $\min RP(\lambda_0, \lambda)$
s.t. $(\lambda_0, \lambda) \geq \mathbf{0}$

(정리 1) 문제 (P)의 쌍대간격(duality gap)은 0이다. 즉, (P)의 최적해 목적함수 값과 (DP)의 최적해 목적함수 값은 동일하다.

(증명)

<그림 1>에서와 같이 (λ_0^*, λ^*) 의 변화에 따라 water-level은 연속적으로 변하고 이에 따라 LR (λ_0, λ) 의 최적해

$P^*(\lambda_0, \lambda) = \arg \max_{P_{k,n}} RP(\lambda_0, \lambda)$ 는 연속적으

로 변화한다. [13]의 정리 1에 따라 (P)의 쌍대간격은 0이다. ■

$RP(\lambda_0, \lambda)$ 의 목적함수를 정리하면 다음과 같다.

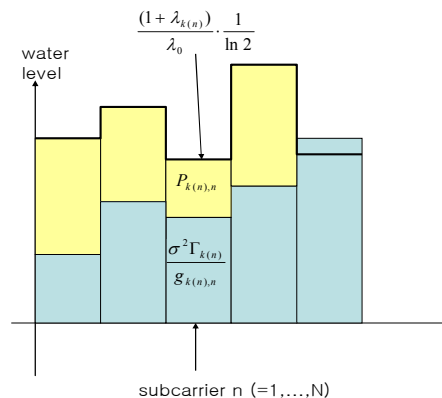
$$\begin{aligned}
 & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \left[(1 + \lambda_k) \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) - \lambda_0 P_{k,n} \right] \\
 & - \sum_{k=1}^K \lambda_k R_k + \lambda_0 P_{tot}
 \end{aligned}$$

여기서 첫 번째 항은 부반송과 n 이 사용자 k 에 게 $P_{k,n}$ 만큼의 전력이 사용되었을 때 전송되는 초과비트로 발생하는 수익에서 사용된 전력으로 발생하는 비용을 뺀 것이다.

$RP(\lambda_0, \lambda)$ 는 N 개의 상호독립적인 문제로 분할된다. 분할된 문제에서 부반송과 n 에 대한 최적할당은 $(1 + g_{k,n} / \sigma^2 \Gamma_k)^{(1+\lambda_k)}$ 가 가장 큰 사용자 $k(n)$ 에 할당하는 것이다. 또한, 각 부반송과에 주어지는 전력은 다음의 수정된 water-filling 방정식에 의해 결정된다.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\sigma^2 \Gamma_k}{g_{k(n),n}} + P_{k(n),n} = \frac{(1 + \lambda_k)}{\lambda_0} \cdot \frac{1}{\ln 2} \quad n = 1, \dots, N \\
 & P_{k(n),n} = \left(\frac{(1 + \lambda_k)}{\lambda_0} \frac{1}{\ln 2} - \frac{\sigma^2 \Gamma_k}{g_{k(n),n}} \right)^+ \quad n = 1, \dots, N \quad (2)
 \end{aligned}$$

이를 도식화하면 다음 그림과 같다.

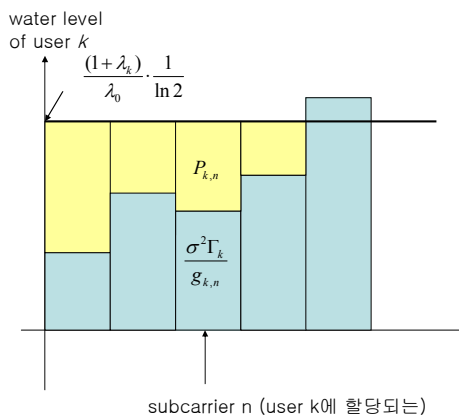


<그림 1> 수정된 water-filling 방정식

부반송과별 막대의 높이는 각 부반송과가 할당

된 사용자의 water level을 나타낸다. 일정한 일반적인 water-filling 방정식에서는 사용자 또는 부반송파에 관계없이 water level이 일정하지만, 수정된 water-filling 방정식에서는 사용자별로 서로 다른 water level을 가지게 된다.

특정 사용자 k 를 중심으로 그린 그림은 다음과 같다. 가로축은 사용자 k 에게 할당된 부반송파들의 집합이고 각 부반송파들에게 할당되는 전력은 사용자 k 의 water level에 의해 결정된다.



<그림 2> 특정 사용자중심의 수정된 water-filling

2.3. Subgradient 쌍대 기법

정리 1에서의 이론적인 결과를 바탕으로 본 연구에서는 다루기 어려운 원문제에 대한 해를 직접 구하지 않고 쌍대문제에 대한 해를 구한다. $RP(\lambda_0, \lambda)$ 는 미분이 불가능하므로 탐색방향으로 subgradient를 활용하는 subgradient 쌍대기법을 적용한다. 즉, 쌍대변수 (λ_0, λ) 는 다음과 같은 수식에 따라 갱신된다.

$$\lambda_k^{l+1} = \left(\lambda_k^l + s^l \left(\sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) - R_k \right) \right)^+$$

$$k = 1, \dots, K$$

$$\lambda_0^{l+1} = \left(\lambda_0^l + s^l (P_{tot} - \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n}) \right)^+ \quad (3)$$

Subgradient 쌍대기법이 수행하는 절차는 쌍대변수에 초기치 (λ_0^0, λ^0) 를 구하고 식 (2)에 따라 초기 전력할당 $\{P_{k,n}^0\}$ 를 구하고 식 (3)에 따라 새로운 쌍대변수값 (λ_0^1, λ^1) 을 구한다. 즉, 식 (2)와 (3)을 반복 수행함으로써 최적해에 수렴하게 된다.

3. 시뮬레이션 구현 및 실험결과분석

3.1 실험데이터 및 결과분석

- 문제 생성을 위한 시스템 패러미터

System parameter		Channel gain	
셀반경	1km	path loss	Okumura-Hata
N	100 개	shadowing	Lognormal
K	10 명	fast fading	Jakes' model
P_MAX	30		
R[k]	U[15,20]		

- 상,하한 계산 및 쌍대변수에 대한 초기치
사용자 k 의 소모전력에 대한 하한 : 아래 모형과 같이 사용자 k 만 존재하는 단일사용자 시스템에서 소모전력을 최소화하는 문제의 해를 구하면 이는 사용자 k 의 소모전력에 대한 하한이 된다.

$$\min \sum_{n=1}^N P_{k,n}$$

$$s.t. \quad \sum_{n=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) \geq R_k$$

$$P_{k,n} \geq 0 \quad \forall n$$

위 문제에 대한 해는 일반적인 water-filling 알고리즘을 적용하면 구할 수 있으며, 최적해의 Lagrangean multiplier를 λ_k 의 초기해($\lambda_k^0 > 0$)로 설정한다.

사용자별 소모전력에 대한 하한을 모든 사용자에게 대하여 합하게 되면 이는 총 소모전력에 대한 하한이 된다.

총 데이터전송량에 대한 상한은 아래와 같이 사용자별 전송요구 비트 제약식을 완화한 문제의

최적해를 구함으로써 도출해 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \max & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{P_{k,n} \cdot g_{k,n}}{\sigma^2 \Gamma_k} \right) \\ \text{s.t.} & \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K P_{k,n} \leq P_{tot} \\ & P_{k,n} \geq 0 \quad \forall k, n \end{aligned}$$

위 문제에 대한 최적해도 water-filling 알고리즘을 통하여 구해질 수 있으며, 최적해의 Lagrangean multiplier를 λ_0 의 초기해($\lambda_0^0 > 0$)로 설정한다.

● 스텝크기(Step Size) s^l

스텝크기는 Subgradient 해법의 수렴속도를 결정하는 중요한 요소로서 본 연구에서는 square summable but not summable $s^l = a/(b+l)$ 를 적용한다. s^l 은 다음과 같은 특징을 가진다.

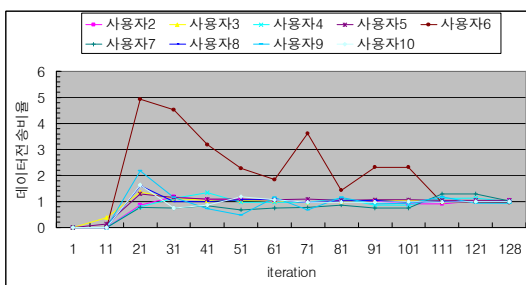
$$\sum_{l=1}^{\infty} (s^l)^2 < \infty, \quad \sum_{l=1}^{\infty} s^l = \infty$$

여기서 본 연구에서는 $a=1, b=\lambda_0^0$ 로 설정하여 사용한다. s^l 은 최적해로의 수렴을 보장한다 [14].

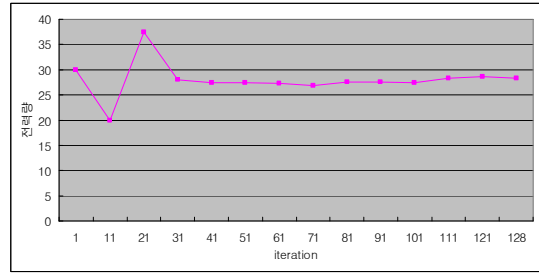
● 수렴판단 기준

수렴의 기준은 쌍대변수 (λ_0^0, λ^0)의 변화량이 0.1%를 초과하지 않는 것으로 설정한다.

● 실험결과



<그림 3> 사용자 전송데이터를 수렴하는 과정



<그림 4> 전력량의 수렴하는 과정

3.3 동적 자원할당

본 연구가 기존연구와 차별화되는 것은 사용자의 추가 또는 삭제, 무선환경의 변화 등 최적해에 결정적인 영향을 미치는 환경변화에 적응하는 동적 자원할당에 적용할 수 있다는 것이다. 즉, 위와 같은 환경변화가 발생했을 때 무선자원 할당 기법을 처음부터 적용하는 것이 아니라 변화가 발생하기 이전에 구해졌던 해에서 환경변화에 적응한 새로운 해로 수렴할 수 있도록 함으로써 계산량을 줄이고 무선인터넷 시스템의 실시간 무선자원 운용기법으로도 활용될 수 있다.

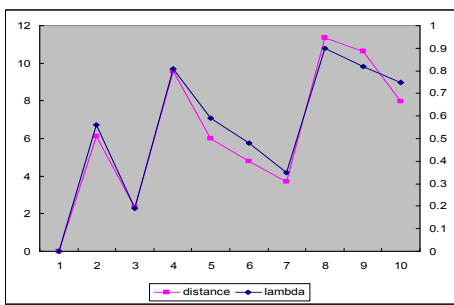
● 사용자 추가

새로운 사용자가 추가됨으로써 본 연구가 기존 연구와 차별화되는 것은 사용자의 추가 또는 삭제, 무선환경의 변화 등 최적해에 결정적인 영향을 미치는 환경변화에 적응하는 동적 자원할당에 적용할 수 있다는 것이다. 즉, 위와 같은 환경변화가 발생했을 때 무선자원할당 기법을 처음부터 적용하는 것이 아니라 변화가 발생하기 이전에 구해졌던 해에서 환경변화에 적응한 새로운 해로 수렴할 수 있도록 함으로써 계산량을 줄이고 무선인터넷 시스템의 실시간 무선자원 운용기법으로도 활용될 수 있다.

사용자가 추가되었을 때 추가된 사용자의 쌍대변수($\lambda_k, k = K + 1, \dots, K + M$)를 0으로 설정하고 전력에 대한 쌍대변수(λ_0)를 그대로 유지하게 되면 부반송과와 전력할당이 최적해에서 심

하게 벗어나서 다시 수렴하는 형태를 지니게 된다. 본 연구에서는 추가된 사용자 및 전력에 대한 쌍대변수에 대한 적절한 초기치를 설정함으로써 수렴속도를 개선한다.

먼저 수렴한 상태에서 사용자의 쌍대변수와 사용자의 기지국으로부터의 거리와의 관계는 아래 그림과 같이 선형적 비례관계를 보인다. 현실적으로 사용자의 거리는 구하기 어렵지만 채널개인을 통하여 추론할 수 있다.



<그림 5> 수렴상태에서 λ_k 와 거리의 관계

이러한 분석을 바탕으로 추가된 사용자의 추가된 사용자의 쌍대변수 (λ_k) 초기치는 사용자와 기지국간의 거리(d_k)에 비례하게 설정한다.

$$\lambda_k = \lambda_{k,\min} + (d_k - d_{k,\min}) \times \frac{(\lambda_{k,\max} - \lambda_{k,\min})}{(d_{k,\max} - d_{k,\min})}$$

$$k^{\min} = \arg \min_k \{d_k\}, k^{\max} = \arg \max_k \{d_k\}$$

전력에 대한 쌍대변수 λ_0 의 새로운 값은 기존 값에서 전체 λ_k 의 합에 대한 추가된 사용자들로 증가된 λ_k 의 합의 비율에 비례해서 증가시킨다.

$$\text{new } \lambda_0 = \left(1 + \frac{\text{sum of added users' } \lambda_k}{\text{sum of all users' } \lambda_k}\right) \times \text{old } \lambda_0$$

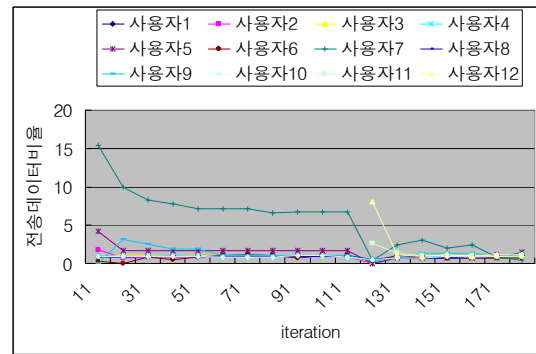
● 사용자 삭제

사용자가 삭제되었을 경우 사용자별 쌍대변수는 그대로 유지하고 전력에 대한 쌍대변수의 초기치는 다음과 같이 감소시킨다.

$$\text{new } \lambda_0 = \left(1 - \frac{\text{sum of deleted users' } \lambda_k}{\text{sum of all users' } \lambda_k}\right) \times \text{old } \lambda_0$$

● 무선환경 변화

시간의 흐름에 따라 무선환경도 변하게 된다. 본 연구에서는 shadow fading과 fast fading을 다시 생성하여 무선환경 변화를 반영한다. 쌍대변수의 초기치는 이전 iteration에서의 쌍대변수값을 그대로 사용한다.



<그림 6> 사용자 추가시 수렴하는 과정

4. 결론

본 연구에서는 다중사용자 OFDM 시스템의 무선자원 할당을 위한 최적화 문제를 제안하고 최적화 문제의 해법으로 Subgradient 쌍대 기법을 제시한다. 최적화 문제는 기존의 연구들을 대부분 포함할 수 있도록 포괄적으로 모형화했다. 또한, 본 연구에서 정의한 쌍대문제는 쌍대간격이 0이며 Subgradient 기법은 최적해로의 수렴을 보장한다. Subgradient 쌍대기법은 빠른 수행시간과 변화에 신속히 적응하는 특징을 가짐으로써 사용자 추가, 무선채널개인 변화 등의 환경변화에 신속히 대응할 수 있는 동적자원할당을 위한 메커니즘으로 활용될 수 있다. 다양한 현실적인 데이터를 바탕으로 실험을 거친 결과 실제로 약 100번의 iteration만으로 최적해에 수렴하는 패턴을 확인하였으며, 환경변화

에 적응하는 데는 약 50번정도의 iteration이 필요해서 초기 최적해보다 빠르게 수렴한다는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] S. Pfletschinger, G. Munz, and J. Speidel, Efficient subcarrier allocation for multiple access in OFDM systems, *7th Inter. OFDM-Workshop*, Hamburg, pp. 21-25, Sep. 2002.
- [2] M. Ergen, S. Coleri, and P. Varaiya, QoS aware adaptive resource allocation techniques for fair scheduling in OFDMA based broadband wireless access systems, *IEEE Trans. on Broadcasting*, vol. 49, no. 4, pp. 362-370, 2003
- [3] J. Jang, K.B. Lee, and Y.H. Lee, Transmit power and bit allocations for OFDM systems in a fading channel, *Proc. of IEEE GLOBECOM*, Dec. 2003.
- [4] H. Kim, Y. Han, and J. Koo, Optimal subchannel allocation scheme in multicell OFDMA systems, *Proc. of Vehicular Tech. Conf.*, vol.3 pp.1821-1825, 2004.
- [5] D. Kivanc, G.Li, and H.Liu, Computationally efficient bandwidth allocation and power control for OFDMA, *IEEE Trans. on Wireless Communications*. Vol. 2, no. 6, pp. 1150-1158, 2003.
- [6] G. Li and H. Liu, Optimal subchannel allocation scheme in multicell OFDMA systems, *working paper*
- [7] G. Li and H. Liu, Dynamic resource allocation with finite buffer constraint in broadband OFDMA networks, *IEEE Wireless Comm. and Networking*, v. 2, pp. 1037-1042, March 2003.
- [8] S. Pietrzyk and G. J.M. Janssen, Multiuser subcarrier allocation for QoS provision in the OFDMA systems, *Proc. of Vehicular Tech. Conf.*, vol. 2, pp. 1077-1081, 2002.
- [9] W. Rhee and J.M. Cioffi, Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation, *Proc. of Vehicular Tech. Conf.*, vol. 2, pp.1085-1089, 2000.
- [10] Z. Shen, J. G. Andrews, B. L. Evans, Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems with Proportional Fairness, To appear in *IEEE Transactions on Wireless Communications*.
- [11] C.Y. Wong, R.S. Cheng, K.B. Lataief, and R.D. March, Multiuser OFDM with adaptive subcarrier, bit and power allocation, *IEEE JSAC*, vol. 17, no. 10, pp. 1747-1757, 1999.
- [12] H. Yin, H. Liu, An efficient multiuser loading algorithm for OFDM-based broadband wireless systems, *Globecomm*, San Francisco, USA, 2000.
- [13] S. Seong, M. Mohseni, and J. M. Cioffi, Optimal Resource Allocation for OFDMA Downlink Systems, *ISIT*, 2006
- [14] Stephen Boyd, Lin Xiao, and Almir Mutapcic, Subgradient Methods, *Stanford University Lecture note*, 2003
- [15] C. Mohanram, S. Bhashyam, A Sub-optimal Joint Subcarrier and Power Allocation Algorithm for Multiuser OFDM, submitted to *IEEE Communications Letters*.
- [16] G. Li and H. Liu, On the Optimality of the OFDMA Network, *working paper*.
- [17] 김인형, 이용훈, 선형 프로그래밍을 사용한 다중사용자 OFDM 시스템에서의 부채널 및 비트할당 방법, *Telecommunication Review*, 제12권 4호, 2002
- [18] J. Gross, H. Karl, et al., Comparison of

heuristic and optimal subcarrier
assignment algorithm, *Proc. of Wireless
Networks*, pp. 249-255, 2003